

A marsi poláris sötét dűnefoltok és lefolyásaik vizsgálata, a DDS-MSO hipotézis

Horváth András

MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete,
Collegium Budapest

Gánti Tibor (1933–2009) emlékére

A marsorbiterek (Mars Global Surveyor – MGS, Mars Express – ME, Mars Reconnaissance Orbiter – MRO) kameráinak (MOC, HRSC, HiRISE) marsfelszíni fotói közül egy tekintélyes rész a sarki hósapkákat mutatja. A sarki hósapkáknak sem az összetételét, sem a fizikai állapotát nem ismerjük pontosan, több területen feltételezésekre vagyunk utalva. A szóba jöhető komponensek a vízjég, a CO₂-klatrát, valamint a szilárd szén-dioxid (szárazjég) – illetve kevés por mint szennyezőanyag (Kereszturi, 2006). Az évszakos hósapka fizikai állapota sem ismeretes, képződése nem folyadékfázis megfagyásával, hanem gázfázisból közvetlenül szilárd fázisba való átmenettel, esetleg részben havazással képződik. Ennek megfelelően a fizikai szerkezete valószínűleg laza hószerű, de a hosszú marsi tél alatt, esetleg tömör jéggé alakulhat. Az évszakos sarki hósapka nyári eltűnése sem olvadáson keresztül történik, hanem közvetlen szublimációval, azaz a jég olvadás nélküli gáz halmazállapotúvá alakulásával. Az alábbiakban a Collegium Budapest Institute for Advanced Study intézetben az Európai Űrügynökség (ESA) és a Magyar Űrkutatási Iroda (MŰI) támogatásával működő Mars Asztrobiológiai Kutatócsoport eredményeiből olvasható áttekintés.

A sarki hósapkáról készült nagyfelbontású felvételeken sokféle különböző képződmény, folt található, amelyek eredete és tulajdonságai jelenleg nincsenek megmagyarázva. Ezek közül egy elég jól elkülönített csoportot alkotnak a sarki sötét dűnéken (dark dunes, *DD-k*) kialakuló ún. sötét dűnefoltok (*dark dunes spots*, *DDS-ek*). A dűnefoltok tél végén – tavasszal tűnnek fel, számuk sok ezerre tehető. E foltok legfontosabb tulajdonságai: 1. sík részeken, döntő számban kör alakúak (*1. ábra*); 2. dőlt területeken megnyúlásos-lefolyásos formájúak (*2. ábra*); 3. szezonális változásuk jól megfigyelhető (*3., 7. ábra*); 4. azonos helyű éves visszatérés is kimutatható (*4. ábra*).

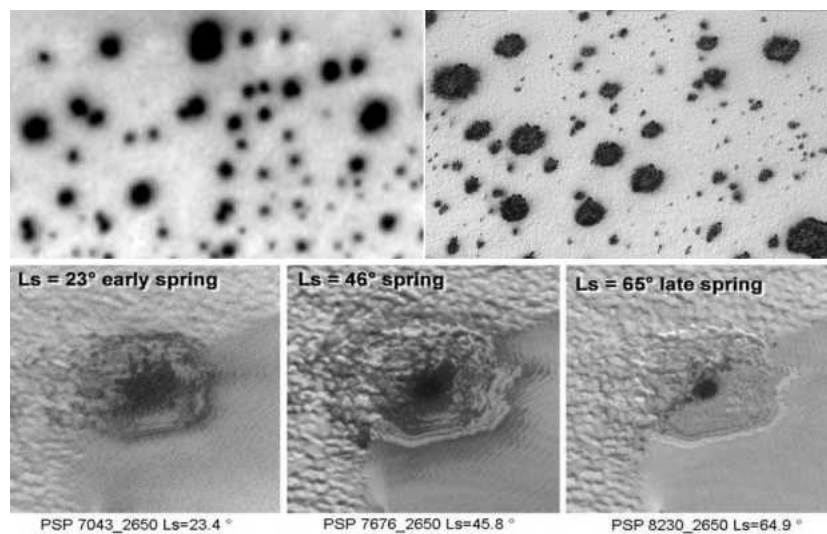
A sötét dűnefoltok képződését a NASA szakemberei kizárólag szublimációs folyamatokra vezetik vissza, azonban a foltok tulajdonságai, megjelenésük, fejlődésük és más tényezők kizárják, hogy egyedül a szublimáció lenne felelős ezek kialakulásáért. Természetesen mivel az évszakos sarki hósapka eltűnése szublimációs folyamattal történik, ennek a jelen esetben is szerepe van, de nem magára a DDS-ek kialakulására és fejlődésére vonatkozóan. Véleményünk szerint e foltok kialakulásában a folyékony víz megjelenése játszik fontos szerepet. Ezt az álláspontot a következő, a marsorbiterek által készített felvételeken látható tapasztalati tények alapján vontuk le (Horváth et al. 2006; Gánti et al., 2003; Szathmáry et al. 2007), amelyet elméleti modellszámítások is kiegészítenek (Möhlmann, 2009, 2009; Kereszturi et al., 2009, 2010a,b):

1. A foltok kialakulása a jég alján, azaz a talajfelszín és a jégréteg között kezdődik és mindaddig tart, amíg fölüle a jégréteg el nem szublimál.

2. Az adott foltok csak a sarki területeken található DD-ken, azaz sötét dűnéken fejlődnek ki, nemegyszer egészen pontosan körülrajzolva a dűnék határvonalait. Ez azt jelenti, hogy a dűnék anyaga valamilyen módon befolyásolja e foltok kialakulását, képződését, fennmaradását. A dérképződés, vagyis a sarki hósapkák kialakulása függhet a talajfelszín minőségétől, mert a talajfelszín kristályosodási gócként hat a jégkristályok keletkezésére. A jégtakaró eltűnése azonban – miután a jég felszínéről történő szublimáción keresztül megy végbe – független az adott talaj minőségétől. Egyedül a szublimációval, azaz a fagyott réteg eltávozásával e foltok kialakulása már csak ezért sem magyarázható.

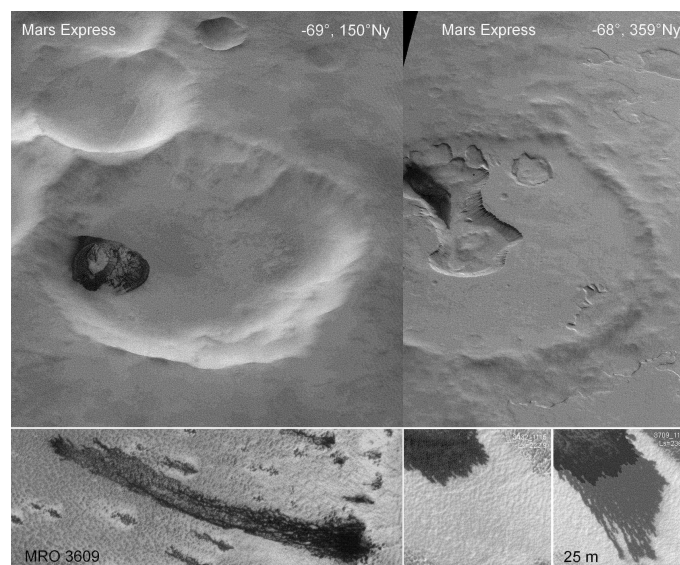
3. A foltok a sík felszínen lényegében kör alakúak (*1. ábra*), ami azt jelenti, hogy kialakulásuk izotrop (iránytól független) fejlődés eredménye. A szublimációs folyamatok függnek a talaj

felszínének a helyzetétől, a napsugarak beérkezési szögétől, a légmozgás irányától stb. Ha e foltok kialakulása kizárólag szublimációs folyamat eredménye lenne, akkor valamilyen módon a talajfelszín egyenetlenségei kellene, hogy tükröződjene a foltok alakjában. Ilyet azonban nem tapasztaltunk. Vízszintes területen a talaj egyenetlenségétől függetlenül a foltok kör alakúak, vagy közel kör alakúak. Ez annyit jelent, hogy létesülésüket csak olyan folyamat indukálhatta, amely a talajfelszín egyenetlenségeitől független. Miután a sötét dűnék anyaga feltételezhetően bazalthomok, ez izotrop közegnek tekinthető, és ebben egy folyadékfázis – jelen esetben a folyékony víz, illetve sóoldat – terjedése vízszintes területen iránytól függetlenül történik. Következésképpen, ha valamilyen oknál fogva a jég alatt folyékony víz képződik és terjed, akkor ez a jég alatt egy közel kör alakú folt megjelenéséhez vezet. Ez is a folyékony víz szerepét támasztja alá a DDS-ek, azaz a sötét dűnéken lévő hótakaró alatt megjelenő sötét foltok kialakulásában.



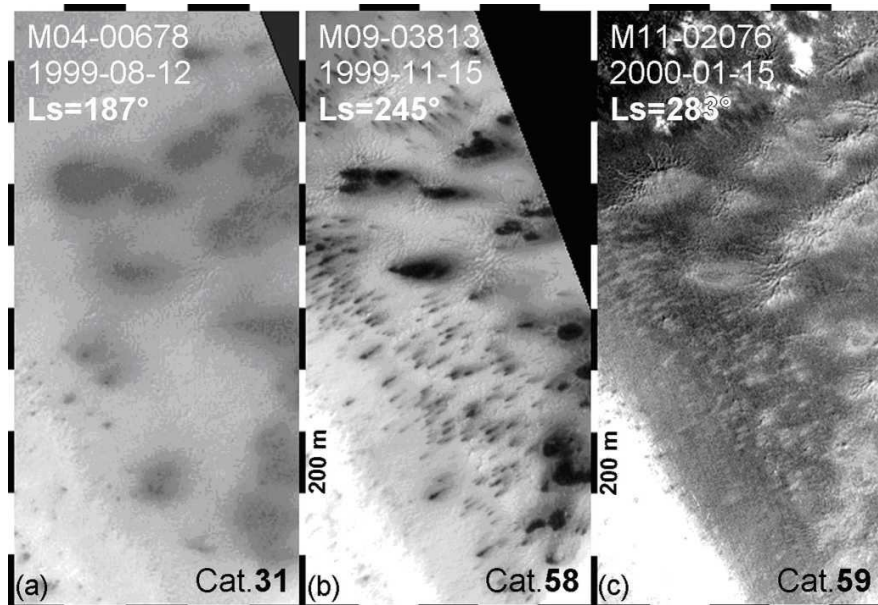
1. ábra. Sötét dűnefoltok (DDS-ek) a Mars déli és északi poláris vidékein.

A felső képek délen készültek: a bal oldali az MGS M03-07564-kép 500x300 m-es kivágata (felbontás ~1,5-2 m, koord. -64°, 42°K, 1999-08-09, Ls=185° tavasz kezdetén); a jobb oldali az MRO HiRISE PSP_003432_1115-kép 500x300 m részlete (felbont. 0,25 m, koordináták -68°, 2°K, 2007-04-20, Ls=223° tavasz közepe. Az alsó képsor az északi poláris körzetben készült, és egy fehér-gyűrűs DDS évszakos változását mutatja tavasz kezdetétől végéig (MRO 100x80 m-es képrészlet, felbontás 0,25 m, koord. 85°É, 1°K, 2008-01-27, -03-16, -04-28).



2. ábra. A marsi sarki sötét dűnefoltok dőlt területen (rézsűkön) lefolyásos jelenséget mutatnak.

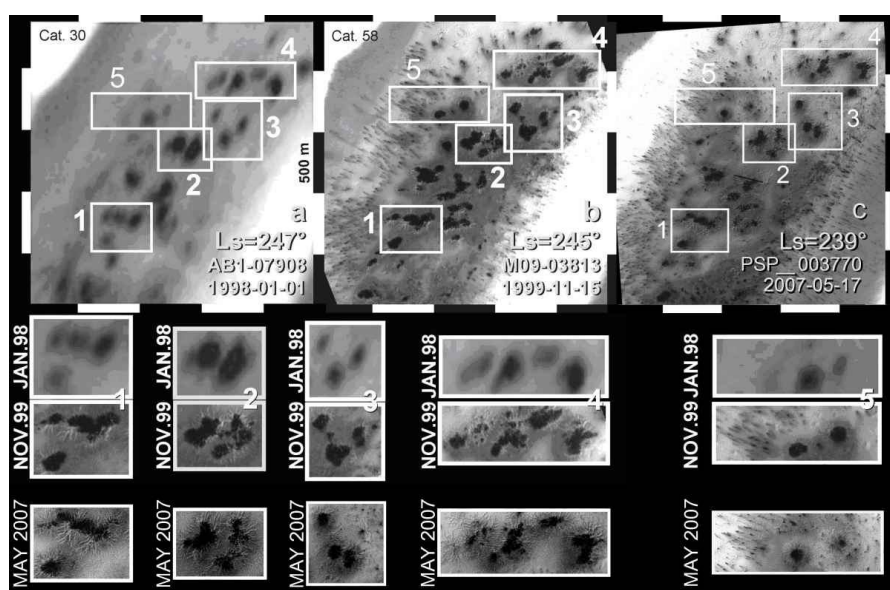
A Mars Express felső képei két 50–58 km átmérőjű déli krátert (koordináták: -69° , 210°K ; -68° , 1°K) mutatnak sötét dűnedombról (DD). Alattuk a kráterekből kinagyított MRO HiRISE részleteken a dűnelefolások (DDS-seepages) vonalasan szétbomló szerkezete, jobbra pedig a lefolyás két fázisa látható 22 nap különbséggel.



3. ábra. A marsi poláris sötét dűnefoltok szezonális változása.

Az ún. Inca City terület (koord. -82° , 296°K) MGS-képeinek 1×2 km-es kivágatain jól megfigyelhetők a DDS-fejlődés fázisai tavasztól nyárig (Horváth et al., 2006; Gánti et al., 2003).

4. Enyhe lejtős terepen a foltok lejtirányban megnyúlnak, ellipszishez hasonló alakúvá válnak (3. ábra), ahol az ellipszis nagytengelye a lejtirányba mutat. Ez azt jelenti, hogy valamilyen lejtirányú erő hat a foltok kialakulására. Ez feltehetőleg nem a szél, mert az eltérő tájoltságú lejtőkön is mindig lejtirányú a megnyúlás. Ilyen hatást porózus közegben szivárgó folyadékokra a gravitációs erő gyakorolhat. Ezért feltételezhető, hogy a foltok kialakulásában folyékony fázis megjelenése játszik szerepet. A folyadékfázis pedig az adott körülmények között más, mint folyékony víz, illetve sűrű sóoldat, nem lehet.



4. ábra. A marsi sarki sötét dűnefoltok azonos helyű éves visszatérése.

Tavaszi második felében az Inca City területéről (koordináták: -82° , 296°K) készült MGS MOC (felső első és második kép felbontása 10 m, illetve 2 m), valamint az MRO HiRISE (jobb oldali kép felbontása 0,25 m) felvételek 2,5x2,5 km-es részleteiből (felül) kinagyított alsó képeken jól látható a foltok éves visszatérése.

5. Meredekebb lejtőkön a foltokból határozott megfolyások indulnak ki lejtirányban. Ezeken a felvételeken már a látvány is azt sugallja, hogy ott folyadékfázis lejtirányú áramlása történik (2. ábra).

6. A talajt télen fehér hótakaró fedi. Ez a hótakaró a nyár elejére elszublimál, és előtűnik a sötét dűnék anyaga. A nyári felvételeken azonban néhol a sötét dűne anyagot világosabb szürke foltok tarkítják (3c. ábra). A foltok eloszlása és helye megegyezik a DDS-ek eloszlásával és helyével, vagyis, ahol tél végén és tavasszal a sötét foltok megjelentek, ott nyáron a talajt valami eltérő tulajdonságú anyag fedi. Mi lehet e szürke foltok anyaga?

7. Végül az a tény, hogy a DDS-ek tél végén kezdenek megjelenni és tavasszal teljeseznek ki, azt mutatja, hogy keletkezésükhöz valami köze van a napsugárzásnak (7. ábra). Úgy is mondhatnánk, hogy a felvételek tanúsága szerint a sötét foltok a napsugárzás hatására keletkeznek, a hó/jégréteg alatt.

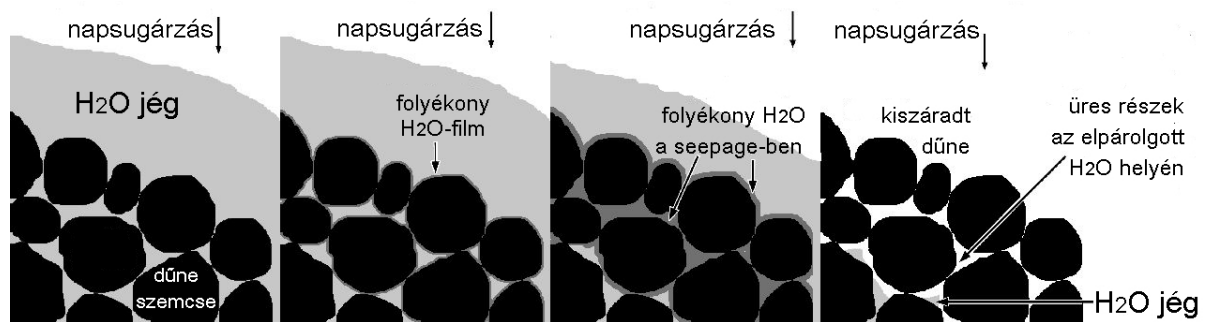
A fentebb felsorolt érvek világosan mutatják, hogy a szublimációs folyamat nem adhat magyarázatot ezeknek a foltoknak a megjelenésére és fejlődésére. Ugyancsak nem ad magyarázatot a foltok tulajdonságaiból következő folyékony fázis, azaz a víz megjelenésére. De ha nem a fagyott réteg eltávozása, akkor mi okozza a foltokat? Mi teszi lehetővé, hogy a jég alatt víz keletkezzen és maradjon meg hónapokon keresztül folyékony állapotban?

A kérdés megoldására dolgozta ki a Collegium Budapest intézetben működő kutatócsoport (*Mars Astrobiology Group, MAG*) a DDS-MSO hipotézist (*Mars Surface Organism, MSO*) (Gánti et al. 2003; Horváth et al. 2006; Szathmáry et al. 2007). A Collegium Budapest MAG-jában Bérczi Szaniszló fizikus, Gánti Tibor vegyész, Horváth András csillagász-űrkutató, Kereszturi Ákos geológus, Pócs Tamás növénybiológus, Sik András geográfus és Diedrich Möhlmann meghívott fizikus Szathmáry Eörs evolúcióbiológus vezetésével végezte, illetve végzi a DDS-MSO hipotézissel, a sötét dűne-foltokkal és lefolyásaikkal kapcsolatos kutatómunkát.

A DDS-ek űrszondás felvételeinek feldolgozásából kapott eredmények első nemzetközi bemutatása 2001 márciusában, a Houstonban rendezett hold- és bolygó kutatási konferencián (*Lunar and Planetary Science Conf., LPSC*), illetve 2001 áprilisában, Moszkvában az Orosz Tudományos Akadémia Interkozmosz-30 elnevezésű nemzetközi konferenciáján történt (Horváth et al. 2001, 2003). Azóta minden évben vittünk anyagokat újabb kutatásainkról Houstonba, Tokióba, Nizzába és az európai bolygó kutatási konferenciákra. Kilenc év alatt több mint 60 előadás, poszter és cikk jelezte tevékenységünket a DDS-kutatásban. A legfontosabb, terjedelmes cikkeink az *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, az *Astrobiology*, az *Icarus* ismert nemzetközi folyóiratokban, valamint két asztrobiológiai témájú könyv egy-egy fejezetében jelentek, illetve jelennek meg. E munkák bibliográfiai adatai a cikk végén találhatók.

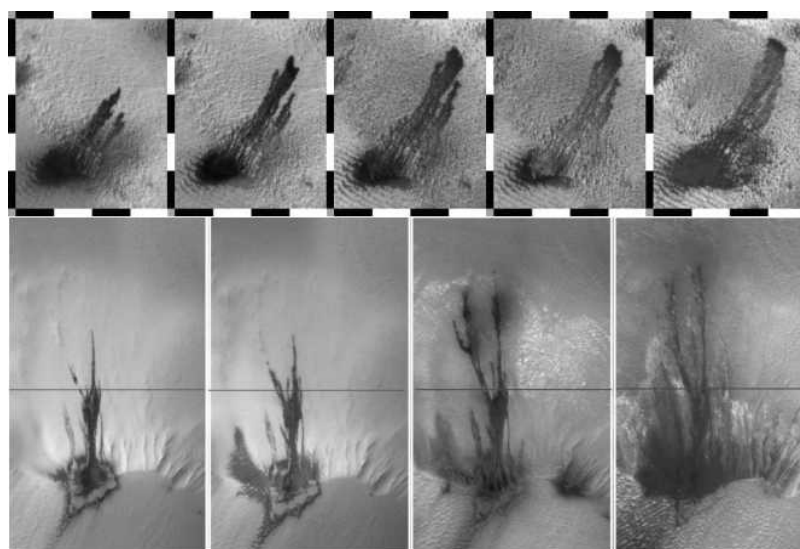
A DDS-MSO hipotézis ismertetésénél abból indulhatunk ki, hogy ha volt valaha a Marson élővilág, a marsfelszíni körülmények drasztikus változása folyamán az élő rendszerek maximálisan próbáltak alkalmazkodni a bekövetkező változásokhoz. Ez természetesen az élővilág döntő többségének nem sikerülhetett a változások roppant erős mértéke miatt. De visszamaradhattak olyan, a fejlődés alacsonyabb fokán lévő rendszerek, amelyek egyes helyeken megtalálhatták az évenként rendszeresen visszatérő életfeltételeiket, miközben a számukra kedvezőtlen időszakot beszáradt, fagyott állapotban igyekeztek túlélni. Ha ez bekövetkezett, akkor ezeknek az élőlényeknek a fotoszintézisükhöz nagy abszorpcióképességű festékanyagokat kellett kifejleszteniük, hogy a beérkező fényt megfelelő hatásfokkal hasznosíthassák. Ha ilyenek maradtak fenn azokon a területeken, amelyeket H_2O -jég/hó fed, akkor ezek tél végén, amikor a Nap felkel, a hó- és jégrétegen keresztül jutó napsugarakat intenzíven elnyelik, miközben maguk felmelegednek. Így kellő napsugárzás esetén maguk körül, a talaj és a hó/jégréteg között megolvaszthatják a vízjeget. Ily módon a jég alatt folyékony víz illetve sóoldat keletkezhet, amelyben ezen marsfelszíni organizmusok (az MSO-k) megtalálhatják az életfeltételeiket.

Kérdés persze, hogy amikor a külső hőmérséklet -80°C -ot is elérhet (Kereszturi et al., 2009, 2010a,b), a jég alatti víz miért nem fagy meg. A válasz a jég/hóréteg rendkívül jó hőszigetelő képességében rejlik. A földi flóra egyszerűbb tagjai tudnak a hó/jég alatt élni és anyagcsere-tevékenységet folytatni. Hasonló, bár kisebb hőmérséklet-különbség tehát, mint amit a Marson feltételezünk a külső hőmérséklet és a hó alatti víz hőmérséklete között, a Földön is előfordul. A feltételezést, hogy a szilárd üvegházhatás lehetséges a Marson, D. Möhlmann fizikai modellszámításai támasztják alá, melyek szerint a dűnefelszín szemcséi között (5. ábra) lehet folyékony H_2O (Kereszturi et al. 2009, 2010a,b; Möhlmann 2008, 2009), így a lefolyásokban ténylegesen víz szivároghat.



5. ábra. A sötét dűnefoltokból kiinduló vízlefolyás-modell mikrostruktúrája (Horváth et al., 2009).

Tél vége felé és tavasz elején a napsugárzás erősödésével, a besugárzás hosszának és a beesési szög növekedésével a foltok egyre intenzívebbé válnak, jelölve annak, hogy a jég alatti vízfilm egyre vastagabbá és kiterjedtebbé válik. Ahol a víz megjelenik, ott a jég/hóréteg szublimálása is intenzívebbé válik, hiszen nemcsak fölülről, de alulról is melegedik. Ezért itt a jég eltűnési folyamata gyorsabban megy végbe, mint az egyéb helyeken. Ennek következtében a folt közepén szublimál el először a fölötte lévő hó/jégréteg, és ekkor az egyébként szürke folt közepén egy sötétszürke-fekete mag jelenik meg. Lejtős terepen természetesen a jég alatti vízre is hat a gravitáció, amelynek következtében a folt növekedése lejtőirányban meggyorsul. Erősebb lejtők esetén a vízfilm olyan vastaggá válhat, hogy kisebb lejtőirányú mélyedésekben intenzív szivárgás indulhat meg a lejtő felé, és így okozhatja azokat a lefolyásokat, amelyeket számos felvételen tapasztalhatunk (2., 6. ábra).



6. ábra. A DDS-ekből kiinduló lefolyások fázisai a déli, illetve az északi pólus körzetében.

Fent a Richardson-kráterben (koord.: -72° , 180°K) készült öt MRO HiRISE felvétel (PSP_3175, 2007-03-31, Ls=211; _3385, -04-17, 221; _3597, -05-03, 231; _3742, -05-15, 238; _3953, -05-31, 249) 80x100 m-es kivágata.

A lefolyás átlagsebessége ~0,5 m/nap (Kereszturi et al., 2009). Alul az északi pólus közelében (koord. 84°, 233°K) készült négy MRO felvétel (PSP_007193_2640, 2008-02-07, Ls=29°; PSP_007404_2640, -02-24, 37°; PSP_007905_2640, -04-03, 54°; PSP_008248_2640, -04-30, 66°) 100x200 m-es részének nagyítása. A lefolyás átlagsebessége ~0,4 m/nap (Kereszturi et al. 2010a).

Nyár elejére az évszakos hóréteg teljes eltűnése után az MSO-k is beszáradnak és a talajfelszínt borító vékony réteggként maradnak vissza. Ezek jelentkezhetnek szürke foltként azokon a felvételeken, amelyeket az orbitek nyári időszakban készítettek a sötét dűnék felszínéről (3c. ábra).

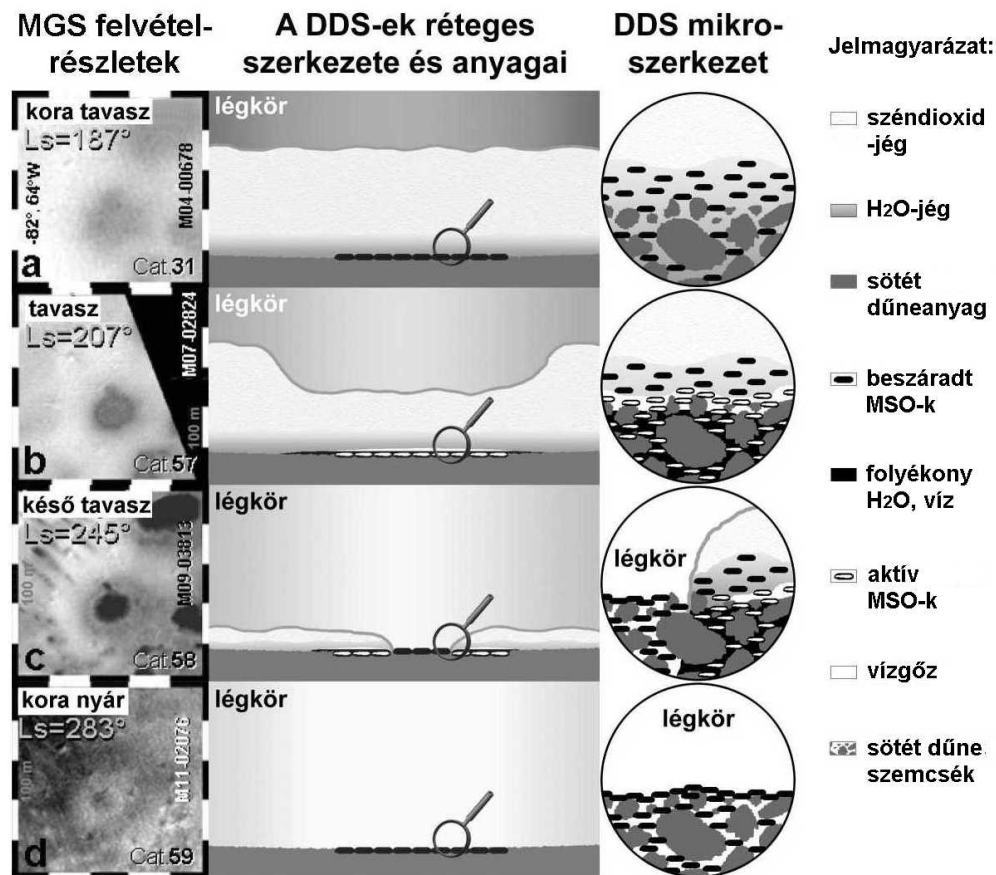
Az elmondottak képezik a DDS-MSO hipotézis magját. Lényege tehát, hogy a téli időszak végén a Mars sarki területein található dűnéken megjelenő foltok folyékony víz megjelenésére vezethetők vissza, amely folyékony víz a jég és a talaj határán a napsugárzás hatására az ott lévő marsfelszíni organizmusok közreműködésével jön létre, ezáltal életteret biztosítva e marsbéli organizmusok számára. Hogy mik ezek az organizmusok, arra ma nem lehet választ adni. Tapasztalataink kizárólag a földi élővilággal kapcsolatban vannak, és egyáltalán nem biztos, hogy ha egy másik bolygón földi típusú élővilág alakult ki, annak az evolúció során ugyanilyen vagy hasonló rendszertani szerkezetű élővilága van. Nem lehet tehát megmondani, hogy mik azok az organizmusok, amelyek ott élnek, csak arra lehet következtetni, hogy alapvetően fotoszintetizáló rendszerek, és hogy az élővilág szerveztségének valamely alsó szintjéhez tartoznak. Ha mégis a földi élővilághoz akarjuk hasonlítani, akkor azt mondhatjuk, hogy ezek baktérium-, kékalga- vagy zuzmószerű élőlények lehetnek. A Földön a száraz és hideg sivatagokban az ún. kriptobiotikus kérget is ilyen organizmusok alkotják. A kriptobiotikus kéreg egyedei szintén a feltételezett marsfelszíni organizmusok lehetséges földi analógiái közé sorolhatók (Horváth et al., 2006; Szathmáry et al., 2007).

A DDS-MSO hipotézis ma már kezdi kinőni az egyszerű hipotézis kereteit, és egyre inkább elméletté fejlődik. Az előzőekben láttuk, hogy azokat a jelenségeket, amelyeket mint tényeket a marsi felvételekből ki lehetett olvasni a DDS-ek tulajdonságaira vonatkozóan és amelyeket az egyszerű szublimációs jelenség nem tud értelmezni, a DDS-MSO hipotézis meg tudja magyarázni (7. ábra). De a fentieken túlmenően egyéb jelenségekre is magyarázatot tud adni.

Egy ilyen jelenség a poláris sötét dűnefoltok finomszerkezetének az értelmezése. Az egyes foltok tulajdonságainak részletes vizsgálata során a következőket lehetett megállapítani: Tél végén először egységesen szürke foltok jelennek meg a fehér hótakarón. Az idő előrehaladtával a foltok közepe táján egy sötét (a felvételeken fekete) központi mag jelenik meg, amelyet, mint említettünk, a felette lévő hó eltűnésével értelmeztünk (7. ábra bal oldali oszlopa). A finomabb vizsgálatok azonban azt mutatják, hogy az esetek egy részében az eredetileg szürke és fekete zóna határán egy világosabb színű gyűrű alakul ki. Ennek a keletkezését a DDS-MSO hipotézis segítségével a következőképpen magyarázhatjuk. A szürke zónából – miután ott folyékony víz van a hó alatt – a talaj mentén folyamatosan víz szivárog a leszáradt fekete zóna határára. Itt, mivel a hóréteg védő hatása megszűnik, a víz az alacsony légnyomás miatt a hideg ellenére igen gyorsan elpárolog. Ugyanakkor a külső térben uralkodó nagy hideg e párát mindjárt dérképződésre készíti, vagyis e két réteg határán folyamatosan új dérképződés indul meg. E frissen keletkező dér okozhatja a fekete mag és a szürke zóna közötti világosszürke gyűrű kialakulását. Felmerül az a kérdés is, hogy miért csak a sötét poláris dűnéken találhatók ilyen foltok, és miért nincsenek a környező egyéb területeken. A DDS-MSO hipotézissel ez is értelmezhető. A NASA megfigyelései szerint a deresedés a pólusokon a sötét dűnéken kezdődik, és tavasszal legutoljára onnan tűnik el a hótakaró. Ez annyira markáns jelenség, hogy a dűnék anyagának körvonalai ezekben a periódusokban élesen kirajzolódnak a környező egyéb felszínektől, mert a dűnék már fehérek, a környezet sötét. Feltehető, hogy a marsi hósapka képződése a vízdér képződésével kezdődik, a lehülés során először vízdér kristályosodik ki, és csak később követi a szén-dioxidhó kicsapódása.

Ezért a dűnék felszínét vízdér borítja, és bár lehetséges, hogy később a vízdér máshol is megjelenik, egyes dűnéken vastagabb, illetve tartósabb réteget képezhet, mint a környező területeken (Kuti – Kereszturi, 2009). Emiatt elsősorban itt van lehetőség tavasszal folyékony víz megjelenésére, és itt teremődnek meg a feltételek élő szervezetek működésére hosszú hónapokra –

földi hónapokban számolva mintegy hat hónapra. Ez az időtartam bőségesen elegendő arra, hogy ott élettevékenység folyjék a nap legmelegebb óráiban.



7. ábra. A DDS-MSO hipotézis megfigyelési, modell és mikrostrukturális illusztrációja (Horváth et al., 2006; Szathmáry et al., 2007).

De van még egy másik tényező is, amely beleszólhat abba, hogy csak a sötét dűnéken találhatóak ezek a tipikus foltok. A Mars talaja általában vörös a benne található vasvegyületektől, elsősorban a hematittól (Fe_2O_3). A Viking vizsgálatának nagy meglepetése az volt, hogy a semlegesnek várt marsi atmoszféra a talaj mentén igen erősen oxidáló tulajdonságokat mutatott. Ezt arra vezetik vissza, hogy a Mars felszínén lévő igen intenzív ultraibolya sugárzás a vasoxidokkal kölcsönhatásba lépve peroxidokat és szuperoxidokat, azaz igen erősen oxidáló anyagokat hoz létre. Ezek az anyagok megtámadják és oxidálják a szerves vegyületeket, így módon szétroncsolják az élő szervezetek anyagait is. A sötét dűnék anyagának a színe nem vörös, hanem sötétkék-sötétlila. Ez annyit jelent, hogy a dűnék anyagában kevesebb vasoxid lehet. Ezért a hipotézisünkben feltételezett marsfelszíni organizmusok, az MSO-k a beszáradás után a nyári időszakban nincsenek olyan mértékben kitéve a peroxidok oxidáló hatásának, mint az egyéb területeken. Itt tehát a beszáradt organizmusok túlélési valószínűsége nagyobb a következő téli időszakig, mint az a sötét dűnéken kívüli területeken várható.

Ez átvezet bennünket a következő kérdéskörhöz. A Mars légköre nem nyújt védelmet az UV sugárzás ellen, ezért a felszínén sokkal nagyobb az ultraibolya sugárzás intenzitása, mint a Földön. Az intenzív UV sugárzás pedig a mikroorganizmusokat elpusztítja. Hogyan élnek túl az MSO-k ezt az egyébként halálos UV sugárzást? A választ két részre kell osztani: mi történik funkcionáló, működő állapotban és mi beszáradt állapotban. Funkcionáló állapotban az MSO-k jég alatt működnek. A vízjég és a vízho igen erősen abszorbeálja az UV sugarakat, és egy vékony közetréteggel már teljes védelmet nyújthat a mikroorganizmusoknak az UV sugárzással szemben.

Más a helyzet nyáron, amikor az MSO-k beszáradt állapotban közvetlenül vannak kitéve az UV sugárzásnak. Egyrészt beszáradt állapotban e szervezetek sokkal ellenállóbbak a sugárzásokkal szemben, mint működő állapotban. Másrészt elvi lehetőség van arra, hogy amikor a beszáradás folyamata elindul, e mikroorganizmusok egy része vagy azok spórái, a talajszemcsék közé, a felszín alá vonuljanak, ahol teljes mértékben védve lehetnek az UV sugárzás ellen. Végül meg kell jegyezni, hogy evolúciójuk során annál hatékonyabb védelmet is fejleszthettek ki e sugarak ellen, mint amilyen példákat erre a Földön is láthatunk, elsősorban a kéalgák körében.

A DDS-MSO hipotézis felállítása idején e két jégréteg közötti, azaz a fagyott talaj és az azt borító jég/hóréteg közötti élet lehetősége hipotézis volt, amely az ismert fizikai és biológiai tapasztalatokból logikusan következhetett. Közben kiderült, hogy ilyen ökoszisztémák a Földön is léteznek, és ezzel ez az indulásnál csak hipotetikus mechanizmus a hipotézisből realitássá vált. Az Antarktiszon ugyanis vannak ún. száraz völgyek, amelyekben tavak találhatók. E tavakat vastag és állandó jégréteg fedi. Az egyik ilyen tóban a jégréteget átfúrva azt tapasztalták, hogy a 6 m-es vastagságú jég közepe táján, úgy 3 m mélységben a jégben egy porréteg húzódik, amelyet valamikor az idők folyamán a szél hordott a jég akkori felszínére. A két jégréteg között e porréteg a napsugárzás hatására felmelegszik, ott zárt vízlencsék keletkeznek, és ezekben a vízlencsékben mikroorganizmusok, algák élnek teljesen zárt ökoszisztémában, azaz a külvilággal nem érintkezve. Az ott élő mikroorganizmusok biztosítják saját életközösségeik számára a tápanyagok körforgását (Gánti et al., 2003; Horváth et al., 2006; Szathmáry et al., 2007). Ez részben hasonló életfeltételeket jelent, mint amilyeneket a Marson a DDS-MSO hipotézis feltételezett.

Mint láttuk, sok konkrét tény támasztja alá a fenti feltételezések helyességét. Mindez azonban még nem jelenti azt, hogy a DDS-MSO hipotézis bizonyított lenne. Hogyan lehet e hipotézist bizonyítani? A végleges bizonyítékot természetesen csak e poláris sötét dűnefoltok közvetlen helyszíni űreszközös vizsgálata adhatja meg, illetve a kérdésre akkor remélhetünk végső választ, amikor e foltokból mintákat hozunk földi laboratóriumokba, vagy amikor emberi marsexpedíciók a helyszínen végeznek erre vonatkozó célzott vizsgálatokat. Utóbbiakra azonban még több évtizedet kell várni.

Irodalom:

A marsi poláris sötét dűnével, lefolyásaikkal és a DDS-MSO hipotézissel kapcsolatos legfontosabb (magyar és nemzetközi) MAG-os irodalom.

Gánti, T., Horváth, A., Bérczi, Sz., Gesztesi, A., Szathmáry, E. (2003): Dark dune spots: possible biomarkers on Mars? *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 33, 515–557

Horváth, A., Gánti, T., Gesztesi, A., Bérczi, Sz., Szathmáry, E. (2001): Probable evidences of recent biological activity on Mars: appearance and growing of dark dune spots in the south polar region [absztrakt 1543]. 32nd Lunar Planetary Science Conference, Lunar and Planetary Institute, Houston, USA.

Horváth, A., Gánti, T., Gesztesi, A., Bérczi, Sz., Szathmáry, E. (2003): Vozmozsnoe dokazatel'stvo nineshnej zszizny na Marsze (Egy lehetséges bizonyíték a mai marsi életről). Az „Intercosmos-30”, nemzetközi tudományos konferencia anyaga, 2001. ápr. 9-10, Moszkva, előadás; (Az Orosz Tudományos Akadémia IK-30 konferenciájának kiadványa), 106–112. o., Moszkva (orosz és angol nyelven)

Horváth, A., Gánti, T., Bérczi, Sz., Pócs, T., Kereszturi, Á., Sik, A. (2006): Marsi sötét dűnefoltok: az élet lehetősége a Marson? *Magyar Tudomány*, 2006/11, 1357–1375

Horváth, A., Kereszturi, A., Bérczi, Sz., Sik, A., Pócs, T., Gánti, T., Szathmáry, E. (2009): Analysis of Dark Albedo Features on a Southern Polar Dune Field of Mars, *Astrobiology* 9(1), 90–103

Kereszturi, Á. (2006): Fejezetek a Mars fejlődéstörténetéből, *Magyar Tudomány*, 2006/8, 946–954

Kereszturi, A., Möhlmann, D., Bérczi, Sz., Gánti, T., Kuti, A., Sik, A., and Horváth, A. (2009): Recent rheologic processes on dark polar dunes of Mars: Driven by interfacial water? *Icarus*, 201, 492–503

- Kereszturi, A., Möhlmann, D., Berczi, Sz., Ganti, T., Horvath, A., Kuti, A., Sik, A., Szathmáry, E. (2010a): Indication of brine related local seepage phenomena on the northern hemisphere of Mars, *Icarus*, 207, 149–164, doi:10.1016/j.icarus.2002.10.012.
- Kereszturi, A., Möhlmann, D., Berczi, Sz., Ganti, T., Horvath, A., Kuti, A., Pócs, T., Sik, A., Szathmáry, E. (2010b): Seepages and the astrobiology potential of polar dunes on, in: *Mars, Astrobiology: Physical Origin, Biological Evolution and Spatial Distribution*, Nova Science Publisher, accepted
- Kuti, A., Kereszturi, Á. (2009): Stabil fagyfoltok a Mars sarkvidékén, *Földtani Közlöny*, 2009/4, 139, 395–402
- Möhlmann, D. (2008): The influence of van der Waals forces on the state of water in the shallow subsurface of Mars. *Icarus*, 195, 131–139
- Möhlmann, D. (2009): Are nanometric films of liquid undercooled interfacial water bio-relevant? *Cryobiology*, 58, 256–261
- Szathmáry, E., Bérczi, Sz., Horváth, A. (2001): Possible biological aspect of DDSs on Mars, Exclusive Symposium “Potential biomarkers on Mars”, 4. Oct. 2001, ESTEC, Noordwijk, Hollandia, előadás.
- Szathmáry, E., Gánti, T., Pócs, T., Horváth, A., Kereszturi, A., Bérczi, Sz., Sik, A. (2007): Life in the dark dune spots of Mars: a testable hypothesis, in: *Planetary Systems and the Origin of Life*, eds. Ralph Pudritz, Paul Higgs, Jonathan Stone, Cambridge Astrobiology, Cambridge University Press, Cambridge: 241–262. o.